第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

台特玛湖干涸湖盆两种典型风蚀坑的三维流场特征及对风蚀的影响

崔珂军[1,2,3,4,5]， 李生宇[1,2,3,4,5]， 王海峰[1,2,3,5]， 范敬龙[1,2,4,5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站，新疆 石河子 832000；4. 中国科学院新疆生态与地理研究所塔克拉玛干沙漠研究站，新疆 库尔勒 841000；5. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：台特玛湖干涸湖盆区风蚀沙漠化快速发展，发育了以新月形沙丘和风蚀坑（主要为槽状坑和碟状坑）为主的风沙地貌。风蚀坑的发育不仅受来流风影响，还与坑内三维流场有关。基于风洞实验和计算机流体力学（Computational fluid dynamics, CFD）数值模拟，对风蚀坑三维流场进行了探究。结果表明：(1) 从入风侧到出风侧，槽状风蚀坑和碟状风蚀坑底面的风速均呈减速—加速—减速—加速的变化模式，上口所在水平面的风速变化呈加速—减速—加速变化模式，上口气流压强也相应地发生变化，槽状风蚀坑和碟状风蚀坑整体呈低压—高压—低压变化模式，其中槽状坑变化更为明显。(2) 两种形状风蚀坑对气流均具有一定的吸附效应，使坑外一定范围的风沙流被吸入坑内，聚集能量和风沙流，加剧风蚀坑风蚀发育。(3) 风蚀坑加剧了地表侵蚀，侵蚀程度与风蚀坑尺度有关，风蚀坑尺度越大，对地表侵蚀越强。本文直观展示了两种典型风蚀坑中的三维速度、压力、风沙流流向分布，揭示了风蚀坑的风沙流吸附机制，研究结果可加深对风蚀坑形态动力学的理解，也可为内陆干涸湖盆沙漠化防治提供理论指导。

关 键 词：风蚀坑；风洞实验；CFD数值模拟；风沙流

文章编号：1000-6060(2022)06-1784-11(1784~1794)

沙漠化是全球最严峻的问题之一，严重影响人民的身体健康和生命财产安全。风蚀坑是沙地和沙漠化地区常见的一种风沙地貌类型，是沙漠化的一种发生过程和具体表现形式。风蚀坑是荒漠化地表风蚀较为严重的表现形式，造成地表景观破碎；在其发育过程中不断释放风成沙，为其他风蚀、风积地貌的形成与发育提供了条件，并不断推动地表沙漠化进程[1]，表征了植被退化是风沙活动增强的直接诱因[2]。

风蚀坑内的气流运动是风蚀坑形态塑造的直接动力，其主要受自身性质以及来流方向的控制[3]，形成独特的流场结构[4]。运用风洞实验和数值模拟对风沙地貌形态动力学过程探究是一项较为成熟的技术。蔡东旭等[5]通过风洞实验探究了沙丘与气流之间的相互作用，发现新月形沙丘与风沙活动之间存在相互反馈作用。Liu等[6]运用数值模拟探究了横向沙丘和金字塔沙丘的风沙流场特征。Jungerius等[7]通过数值模拟建立二维风蚀坑模型，模拟研究了风蚀坑的二维流场变化情况。Smyth首次应用计算机流体力学（Computational fluid dynamics，CFD）软件对风蚀坑内外气流特征进行模拟[8]，并根据实际情况对实地风蚀坑上口水平面的气流进行了数值模拟与实地实验相对比[9]，实现了风蚀坑的气流三维立体展示同时量化了大风沙尘暴事

收稿日期：2022-02-23； **修订日期**：2022-03-26
基金项目："第三次新疆综合科学考察项目"子课题"风沙灾害风险评估与防治区划"（2021xjkk030504）资助
作者简介：崔珂军（1995-），男，硕士，主要从事干旱区风沙地貌等方面的研究. E-mail: 464509354@qq.com
通讯作者：李生宇（1975-），男，正高级工程师，主要从事风沙地貌与风沙工程等方面的研究. E-mail: lishy_hb@163.com

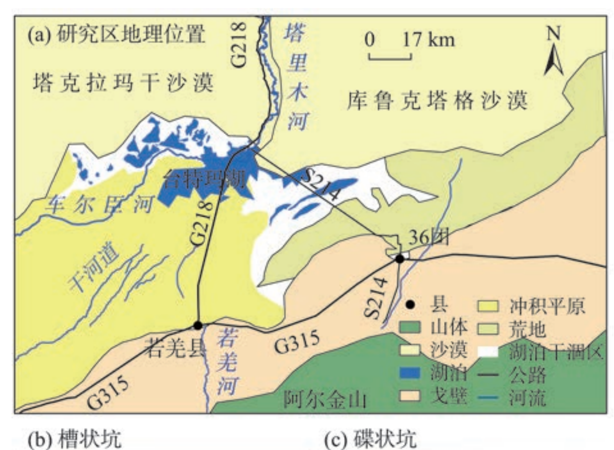
件。同时，现有学者已对海岸、沙质草原风蚀坑的形态[10]、气流[11]、蚀积速率[12]和演化过程[13-14]进行了大量研究。

受全球气候变暖影响，中亚地区荒漠化问题日趋严峻，加之人类对水资源的不合理开发利用，很多内陆湖泊逐渐萎缩退化，甚至干涸（如位于新疆塔里木盆地东部的台特玛湖）。台特玛湖自1972年干涸后，干涸湖盆风蚀沙漠化快速发展，当地生态环境恶化，严重制约区域经济社会可持续发展。迄今为止，台特玛湖干涸湖盆已经历经半个世纪的沙漠化发展，干涸湖盆上已发育了多种风沙地貌，其中风蚀坑是主要的风蚀地貌类型，形态各异且分布广泛，与新月形沙丘（链）、灌丛沙丘共同构成了风蚀沙漠化初期的风沙地貌景观。该区发育的风蚀坑与海岸和沙质草原的形态有所不同，普遍不发育坑后积沙体，地表物质为河湖相沉积，呈沙土和黏土互层结构，沙层较为松散，以极细沙和粉沙为主，细沙含量次之[15]，夹杂少量干枯的柽柳、芦苇等植物的根系。目前，关于内陆干涸湖盆区风蚀坑的形态动力学过程研究鲜有报道。

台特玛湖干涸湖盆区正在成为库鲁克塔格沙漠的新扩展区，查明该区风沙地貌形成发育规律是科学治理的重要前提。虽然一些学者运用CFD软件已对风蚀坑内气流进行了模拟，但风蚀坑的三维风沙流模式认识仍不全面[9]。本文通过风洞实验并辅以CFD数值模拟，探明内陆干涸湖盆地区典型形态风蚀坑的三维流场特征及对地表侵蚀影响，研究结果可以丰富内陆干旱区风沙地貌发育理论，为沙漠化土地治理提供科学基础。

1 研究区概况

台特玛湖位于库鲁克塔格沙漠与塔克拉玛干沙漠之间（图1），是沙漠中的生命湖，是若羌县取水源地，由塔里木河和车尔臣河汇流形成。20世纪60年代之前，塔里木河和车尔臣河上游水资源充足尚未开发利用，大量河水汇入台特玛湖，使湖面面积一度达到约150 km^2。但随着上游水资源的开发利用和浪费，来水逐渐减少，台特玛湖湖面水位不断下降，并裸露出大片干涸湖盆区，湖面面积逐渐变小直至干涸[16]。2000年以来，随着塔里木河流域综合治理工程建设，塔里木河流域管理局先后组织实



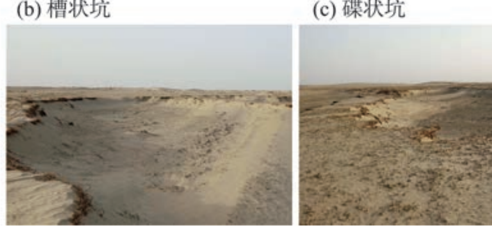


图1 研究区地理位置及区域内发育的两种典型风蚀坑

Fig. 1 Location of the study area and two typical blowouts developed in the region

施了多次下游生态输水，水头可到达台特玛湖，并可形成数百平方千米的湖面，此时的湖面基本位于218国道以西地区，而218国道以东的原干涸湖盆因风沙堆积地形抬高，生态输水难以到达，依然是一片风蚀沙漠化快速发展的干旱荒凉之地。

台特玛湖干涸湖盆区气候极端干旱，多年平均降水量仅23.33 mm，而年蒸发量达2673.2 mm，干燥指数为63.0，平均相对湿度为41.1%；地处塔里木盆地东灌风的风口地带，盛行NE、ENE风，风力强劲，多年平均风速为2.16 $m\cdot s^{-1}$，多年平均大风（风速≥17.2 $m\cdot s^{-1}$）日数达28.2 d，最大风速17~25 $m\cdot s^{-1}$，瞬时最大风速40 $m\cdot s^{-1}$[17]；而河湖相沉积平原的沉积物固结程度较差，结构松散而干燥，地表植被稀少，几乎呈裸露状态，部分地段发育了厚度不同的盐壳。在长期的强风沙作用下，湖盆地表产生风蚀破口，下伏松散沙层出露，水平和垂直风蚀速度加快，形成大小不一的风蚀坑以及多种形态的沙丘。该区风蚀坑与草原地区风蚀坑不同[18-19]，处于平沙地中，坑后无积沙区，是由于风力强劲，无植被阻挡，下垫面较草原地区粗糙度小，坑内沙粒被大风吹蚀，裹挟到离坑较远地区。经卫星遥感影像测量发现，风蚀坑类型主要为槽形和碟形，较大风蚀坑长轴为168 m，短轴为70 m，较小风蚀坑长轴为8 m，短

轴为5 m。

2 数据与方法

2.1 风洞试验

实验在中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站的风洞实验室中进行。该风洞由中国航空工业空气动力研究院设计和建造(图2a),属直流吹气式低速风洞,由动力段、整流段、实验段和扩散段4部分组成,全长16.2 m,其中实验段长8 m(可放置模型段长4 m),截面宽1.3 m、高1.0 m;采用侧壁扩散式结构,侧壁扩散角0.2°;实验风速0~20 $m\cdot s^{-1}$可调。

实验模型用石膏制作(图2d~e),大小按照实际比例缩小300倍,具体参数如图2d中所示。实验时模型表面的气流速度由毕托管(高度分别为1 cm、2 cm、3 cm、7 cm、10 cm、15 cm、30 cm、50 cm)测量压力计算而得(图2c),气流流向由粒子图像测速仪(Particle image velocimetry,PIV,型号Dynamic Studio)测量(图2b)。PIV可以跟踪流场中示踪粒子(直径小于10 μm,甚至nm级)的运动,并用数字相机同步拍摄流场照片,系统基于前后两帧粒子图像来计算粒子位移,对其进行互相关,计算得到流场内一个切面的速度场,并可进一步计算得到切应变率、涡度等各种运动参数[20]。

将风蚀坑模型置于风洞的木质底板中央,使风蚀坑上口水平面与底板齐平(图2c)。在风蚀坑模型中轴线上布设11个测点,分别在6 $m\cdot s^{-1}$、9 $m\cdot s^{-1}$、12 $m\cdot s^{-1}$来流风速下测量风蚀坑的表面风场。基于风速数据,用Surfer 10.0绘制模型表面风场图。

用玻璃罩将激光发射器罩住,置于模型的正前方。双通道脉冲激光采用5级强度,间隔160 ms。高速粒子摄像机置于模型正上方,连续拍摄10张图片,以记录粒子运动方向。基于观测数据,用粒子流向处理软件(Dynamic Studio)绘制粒子流向图。

在33 cm×33 cm沙盘上,用印模手工制作大小不同两种槽状风蚀坑沙盘模型,大模型缩尺比约为1:320,小模型约为1:330,同时设置无风蚀坑沙盘。分别在7.5 $m\cdot s^{-1}$和8.5 $m\cdot s^{-1}$风速下进行净风吹蚀实验,用1/1000 kg电子秤称量吹蚀前后沙盘重量,计算出风蚀量。

2.2 数值模拟

使用模拟软件ANSYS进行流场模拟,其中计算模型采用k-ω模型中的SST模型(SST模型集成了标准k-ε模型和k-ω模型的优点,特别适用于逆压梯度流动和分离流动)。本文模拟的风沙流马赫数均小于0.3,为不可压缩流动,计算域模型出口边界条件为压力出口,压力差为0,计算域模型入口边界条件设置为速度入口,入口为典型风速廓线流[21],大小

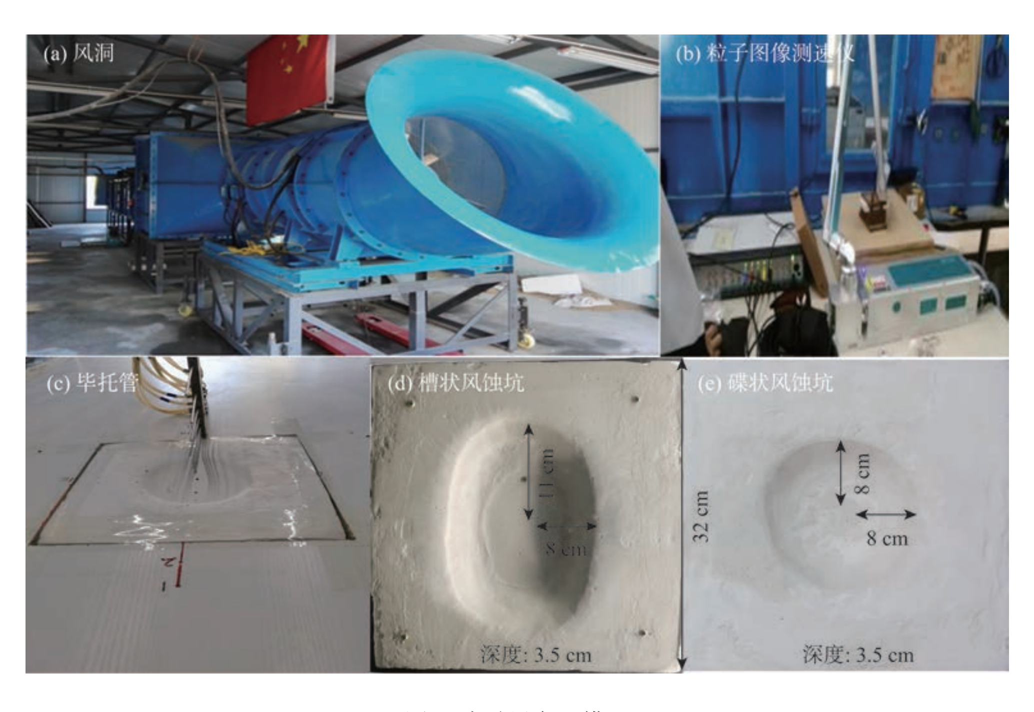


图2 实验设备和模型

Fig. 2 Experimental equipment and model

为33 m×33 m×11 m，槽状风蚀坑长轴为22 m，短轴16 m，深度3.5 m；碟状风蚀坑长轴短轴都为16 m，深度3.5 m。风沙流中沙粒粒径为0.075~0.250 mm，因此数值模拟中沙粒粒径设定为d_s=0.15 mm，形状为颗粒，沙粒密度ρ_s=2650 kg·m^{-3}，黏度μ_s=0.0047 Pa·s，初始沙粒体积分数为1%，类型为FLUID。空气密度ρ_k=1.225 kg·m^{-3}，空气动力黏度μ_k=1.789×10^{-5} Pa·s，模拟风速选取6 m·s^{-1}。计算网格采用三角形划分，网格数量分别为365490、262050（图3），质量良好。

3　结果与分析

3.1　风洞实验数据分析

3.1.1　*风蚀坑测点风速廓线*　从槽状坑内及周边各点的风速廓线可知，多数测点的风速廓线整体呈两段式，在3~7 cm高度范围内甚至出现风速随高度增加而降低的现象（图4）；而风蚀坑外的测点15风速廓线呈对数型，符合正常情况，说明测点15气流受

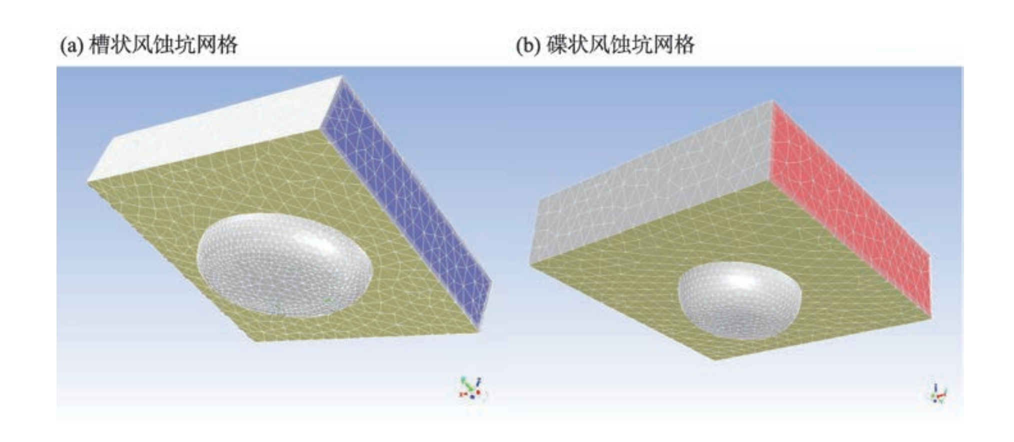


图3　网格划分

Fig. 3　Mesh division

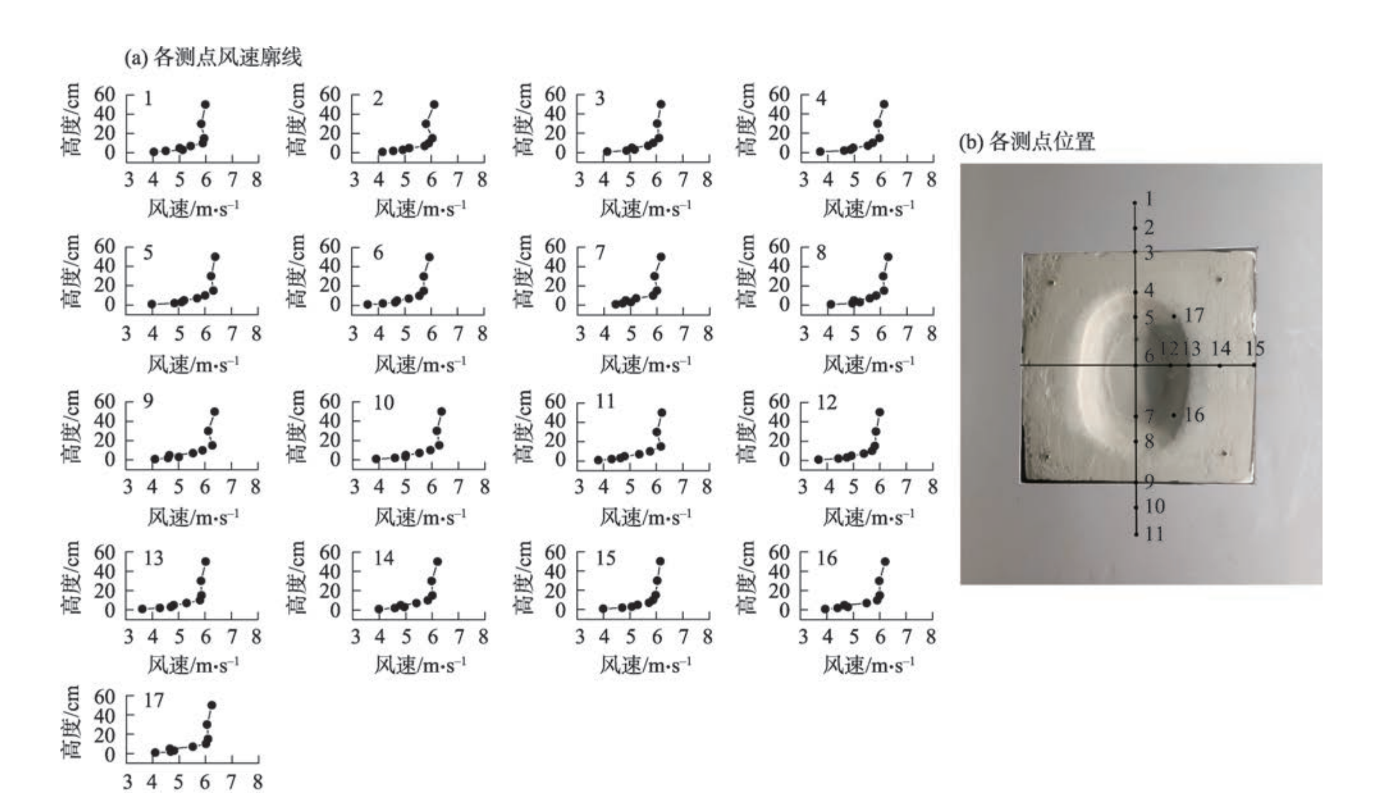


图4　风速廓线图

Fig. 4　Wind speed profiles

模型影响很小,而其他点受模型影响很大。

3.1.2 风蚀坑的纵剖面风场 在不同指示风速下,槽状坑和碟状坑纵剖面风场图可以看出,模型坑口以上主要影响高度在20 cm以下。

在6 m·s^{-1}指示风速下(图5a),随着气流靠近风蚀坑内背风坡处,两种模型即开始呈现不同的风速变化。在槽状模型背风坡处(X=11.4~15.9 cm),出现气流加速现象;而在碟状模型背风坡(X=15.3~19.8 cm)则相反,出现气流减速现象。气流到达模型中部时(槽状X=15.9~22.2 cm、碟状X=19.8~24.8 cm),槽状坑等值线上凸,形成减速区,而碟状坑等值线下凹,形成加速区。气流流经槽状风蚀坑尾部迎风坡时(X=22.2~33.2 cm),等值线下凹,形成加速区,而流经尾部迎风坡时(X=24.8~29.3 cm),7 cm以上等值线上凸,形成减速区,7 cm以下等值线下凹,仍为加速区。

在9 m·s^{-1}指示风速下(图5b),槽状风蚀坑前中部(X=11.4~29.2 cm)为减速区,尾部迎风坡(X=29.2~33.2 cm)为加速区,较6 m·s^{-1}指示风速相比,加速区后移;碟状坑风速呈现先减速后加速趋势,较6 m·s^{-1}指示风速相比,中后部7 cm以上变为完全加速。

在12 m·s^{-1}指示风速下(图5c),槽状坑速度变化趋势与9 m·s^{-1}类似,为先减速后加速,但减速区等值线更平滑,速度递减率更小;碟状坑速度变化趋势也与9 m·s^{-1}类似,但等值线最凸处较9 m·s^{-1}后移1.5 cm,且减速区等值线起伏大,速度递减更快。

3.1.3 风蚀坑内的气流方向 图6为图像粒子测速仪获得的两种模型表面的风沙流流向图。由图可知,在风蚀坑上口水平面,入风侧处气流出现较大变化,而在风蚀坑的中部与后部,风沙流流向与初始流向一致。在入风侧处风沙流的流向受模型影响而发生偏转(图6的A、C、E、G区),并在入风侧处形成风沙流向坑内吸附现象,也有风沙流从坑外侧向坑内侧聚集时发生的风沙流逆转现象(图6的A、B、C、E、G区),形成了以模型边缘为分界线的对向风沙流(图6的B区),而碟状风蚀坑在入风侧(图6的F区)处则没有风沙流逆转现象。

3.2 CFD数值模拟数据分析

3.2.1 模拟真实性验证 在以上风洞实验与数值模拟中,风蚀坑模型上口水平面风速具有较好的吻合性(图7),表明k-ω模型中的SST模型能较好的模拟风蚀坑的动力学特征,这解决了Smyth等[9]所使用k-ε模型模拟中出现风蚀坑背风侧不准确的问题。

3.2.2 速度 通过CFD速度模拟发现,在两种风蚀坑模型上口入风侧背风坡处气流首先加速,随后减速,到达模型中部时再次加速,在出风侧处形成尾流加速区(图8a、c),速度变化的位置与风洞实验结果一致。两种风蚀坑模型差别在于槽状模型入风侧加速区范围大于碟状模型。从模型底面可以看出坑内表面流速变化情况。在两种风蚀坑模型底部,气流进入风蚀坑内部,随着空间增大气流流线发生分离,在入口处背风坡风速降低,模型中部又开始加速,在尾部迎风坡处大幅度减速,到达模型外形成尾流加速区(图8b、d)。

风蚀坑上口水平面气流与底部气流大小不同,

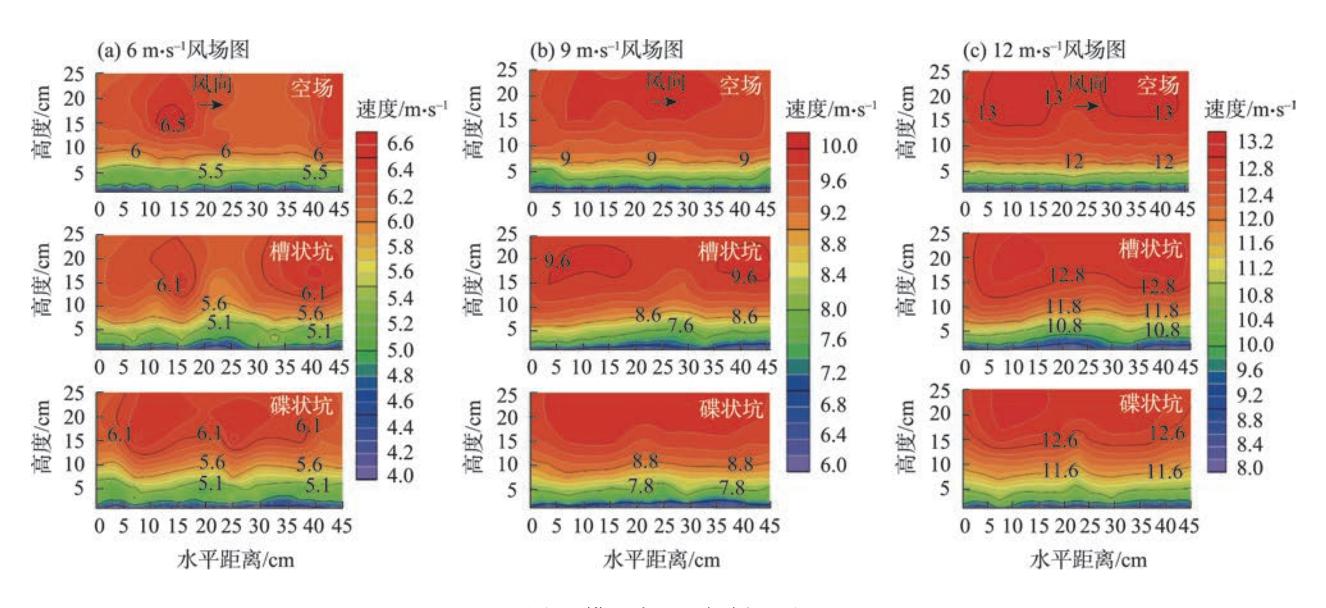


图5 模型表面风场剖面图

Fig. 5 Profiles of wind field on the model surface

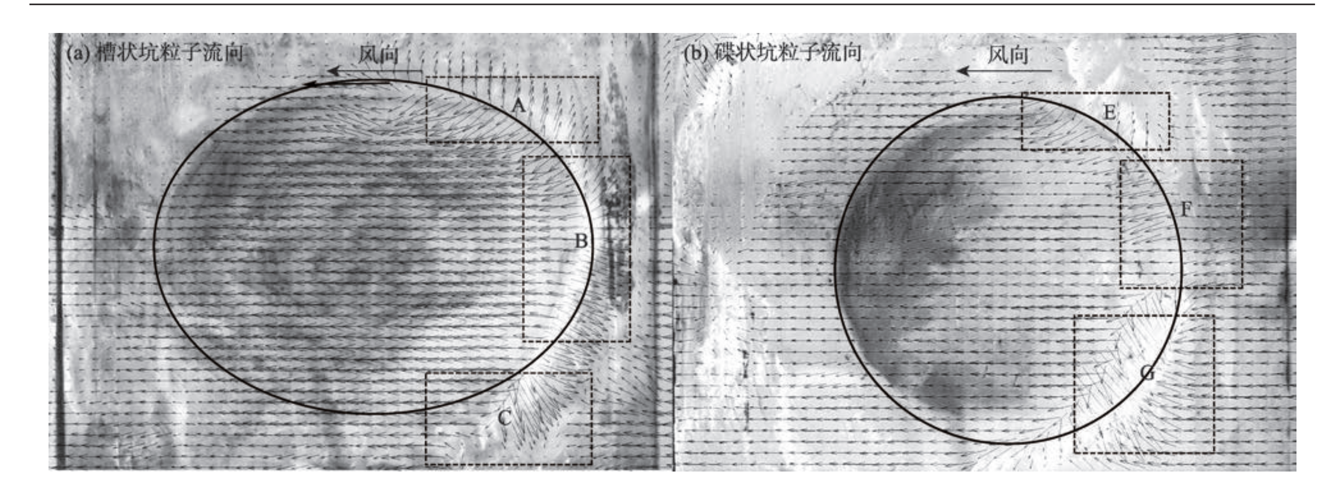


图6 模型表面风沙流流向图

Fig. 6 Diagram of flow direction of wind and sand flow on the model surface

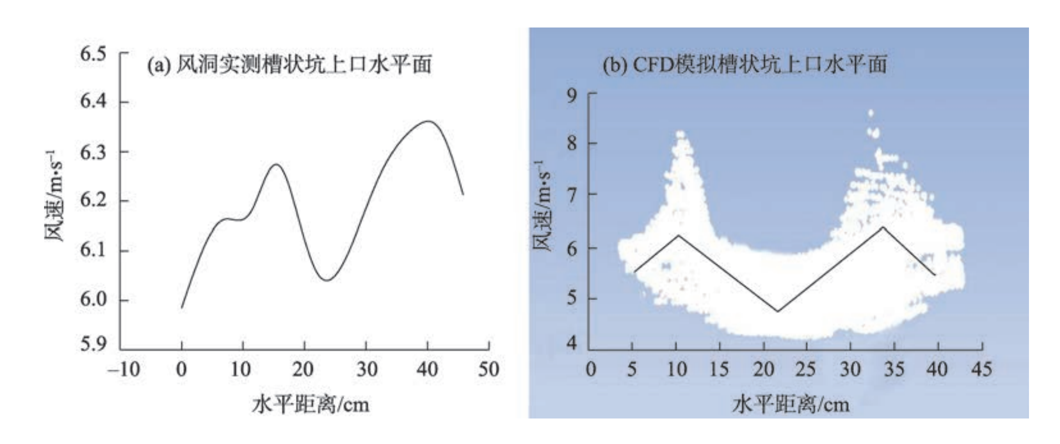


图7 实测和模拟风蚀坑中轴线纵向风速变化对比

Fig. 7 Comparison between measured and simulated longitudinal wind speed changes in the central axis of blowout

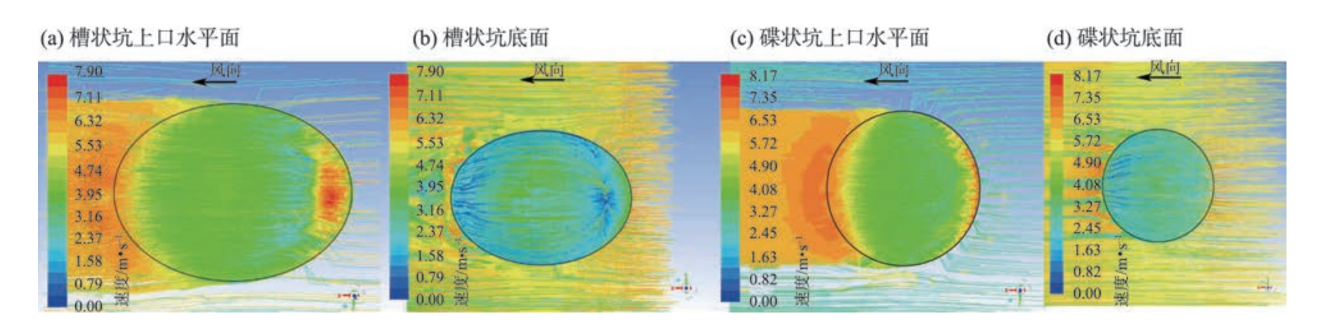


图8 CFD模拟速度分布

Fig. 8 CFD simulated speed distribution

上口水平面气流主要受空气阻力影响，而底部气流受空气阻力和地面摩擦力影响，因此底面流速整体小于上口。虽然两种模型内部都有加速区，但速度仍小于初始速度(6 m·s^{-1})，因此，在风蚀坑的负地形作用下，近地表风能总体呈被削弱状态。

气流在进入风蚀坑后，发生附面层分离，在坑底扩散减速，并在槽状坑前部出现涡流，与王帅等[22]和孙禹等[23]野外对槽状坑观测结果一致，但本研究还发现气流在风蚀坑上口的入风侧处气流为加速状态，这与气流集聚辐合进入风蚀坑有关。风蚀坑内的气流变化模式不仅与风蚀坑形状、空间尺度、来流速度有关，还受风的入射方向影响[24]。两种风蚀坑内气流变化的差异主要源于风蚀坑的空间尺度的不同。与碟状坑相比，槽状坑长轴更长，气流

发育空间相对充足，速度及压力变化明显。

3.2.3 **压力** 风蚀坑模型表面压力分布能反映流速变化和气流运动方向。两种模型上口水平面（图9a、c）都在入风侧背风坡处形成低压区，随风沙流继续深入，压力逐渐增大，在模型迎风坡处达到最大，而在出风侧处因风沙流加速溢出又形成低压区，整体中部压强高，而两侧压强低；槽状模型入风侧低压区范围大于碟状模型，而碟状模型后部低压区范围较大（图9c）。模型底面（图9b、d）压力变化趋势与模型上口不同，压强呈前低后高分布模式，且碟状模型底部入风侧低压区范围更小，而后部没有低压区。在底部强烈高压区风沙流侵蚀作用下，坑后缘向下风向扩展[25]，这与风洞实验观测到的结果一致（图10）。此外图10中发现有微小的溯源侵蚀现象。

3.2.4 **风沙流流向** 查明风蚀坑内风沙流流向有助于更好地理解风蚀坑的形态动力学过程。图11为CFD模拟的两种风蚀坑内气流的流向，可见风蚀坑对近地表气流产生了很大扰动，流线偏转，流向趋于复杂化，坑外的气流受局地气压影响，被吸附到坑内，并沿侧壁行进（图11a、c）。在风蚀坑内部，气流运动更加复杂，在入风侧背风坡多有涡流发育（图11b），而在模型底部中心线处，气流直线前进，随着向两侧延展，气流沿着底面坑壁呈螺旋曲线前进（图11a），这与Hesp研究的海岸带槽状风蚀坑气流模式一致[26]，但又略有不同：气流螺旋前进现象

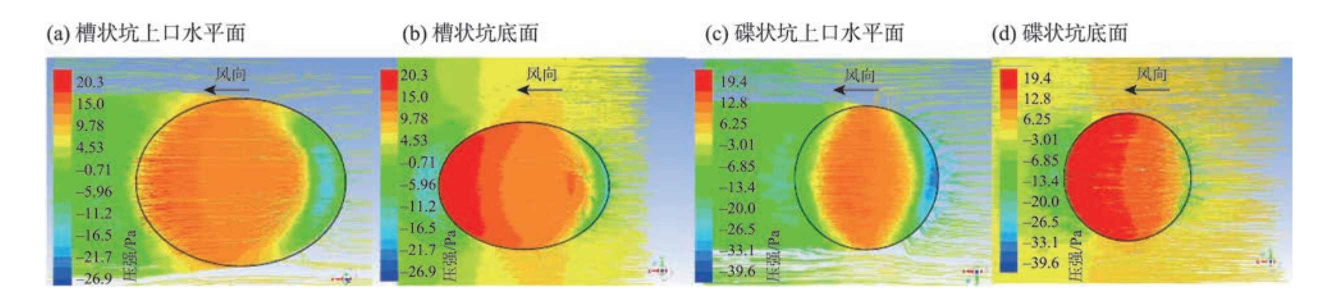


图9 CFD模拟压力分布

Fig. 9 CFD simulated pressure distribution

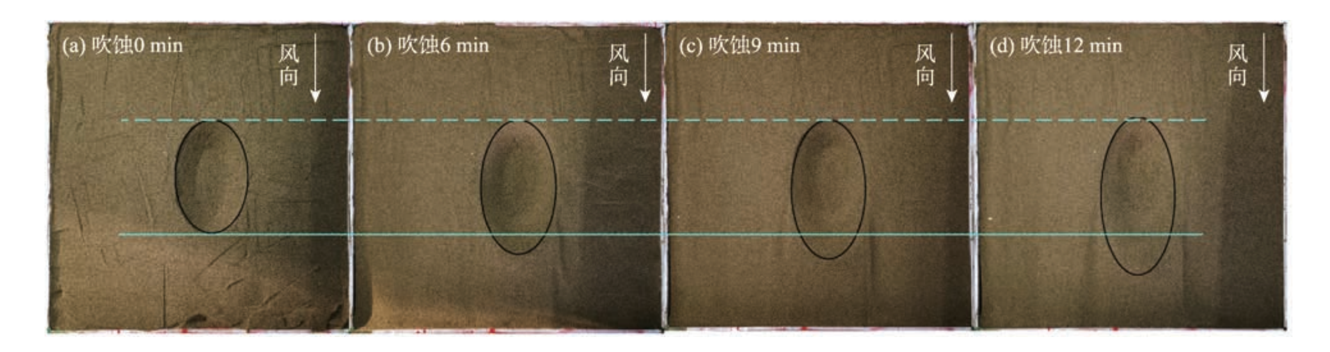


图10 槽形模型发育过程

Fig. 10 Slotted model development process

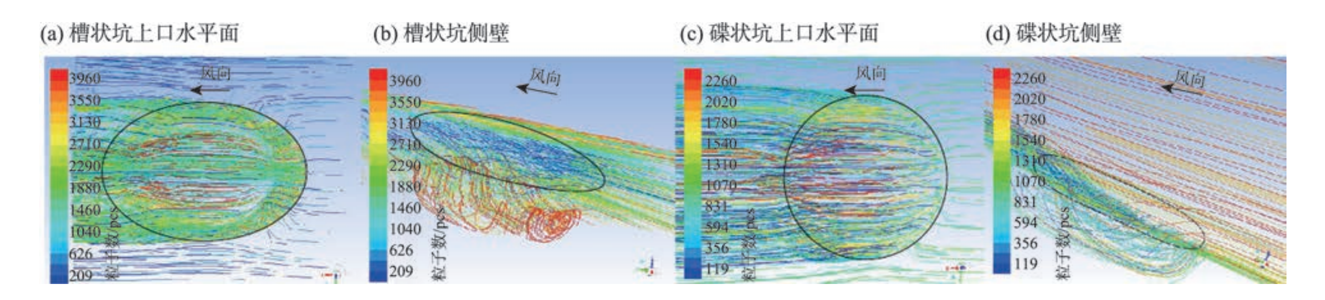


图11 CFD模拟风沙流流向

Fig. 11 CFD simulation of wind and sand flow direction

仅出现在侧壁上，中部气流顺坑壁弧形前进。碟状模型入风侧的涡流规模尺度小于槽状模型(图11c)，碟状模型侧壁风沙流沿坑壁前进，没有发育涡流(图11d)。风蚀坑内发育的涡流一定程度可以解释PIV测量中出现的对向流现象。

4 讨 论

4.1 风沙流吸附机制

以上模拟发现，近地表气流对两种风蚀坑地形表现出极其复杂的响应，尤其发现在槽状坑和碟状坑的坑口入口处都有加速现象。这与周围气流向负地形辐合汇集有关，而气流汇聚则与气流自身重力和坑口局部的低压区有关。气流流向模拟也发现风蚀坑具有吸附效应，流经坑外一定范围的气流被吸附到坑内(图11、图12)，坑口及其上方一定高度范围的气流都向坑内汇聚(图12)。测量发现，在6 m·s^{-1}风速下，两种风蚀坑两侧吸附范围大约为短半轴的0.25倍，垂直吸附范围大约为深度的1.56倍，且多发生于风蚀坑的前中部。由伯努利效应(不可压缩流体流速越快，流体产生的压力就越小)可知，坑口处流速增大导致压力变小，因而使周围气流在压力差作用下被吸入坑内。根据流体力学的能量守恒定律，由于风蚀坑的吸附机制，两侧和上方的气流携带能量被聚集到坑内，使坑内气流能量增加，同时也将风沙流带入坑内，而风蚀坑出风侧处气流能量较集中释放(图8)，加剧了风蚀坑出风侧的侵蚀，使风蚀坑逐渐发育。孙禹等[23]在槽状坑气流观测中也观测到气流被吸入坑内的现象，但没有量化被吸入气流的范围，也没有从能量汇聚角度分析对风蚀坑发育的意义。本研究较全面获取了风蚀坑的流场信息，证实了涡流的存在，并阐明了风蚀坑的风沙流吸附机制，有助于深入理解风蚀坑的风沙动力过程。

风蚀坑的吸附机制汇聚能量加剧对地表的侵蚀。对不同沙盘采用不同风速吹蚀12 min后发现(表1)，在大风条件(8.5 m·s^{-1})下，小尺度风蚀坑沙盘和大尺度风蚀坑沙盘的风蚀量百分比分别比平坦沙地沙盘的大3.14%、6.96%；在小风条件下，小尺度风蚀坑沙盘和大尺度风蚀坑沙盘风蚀量百分比



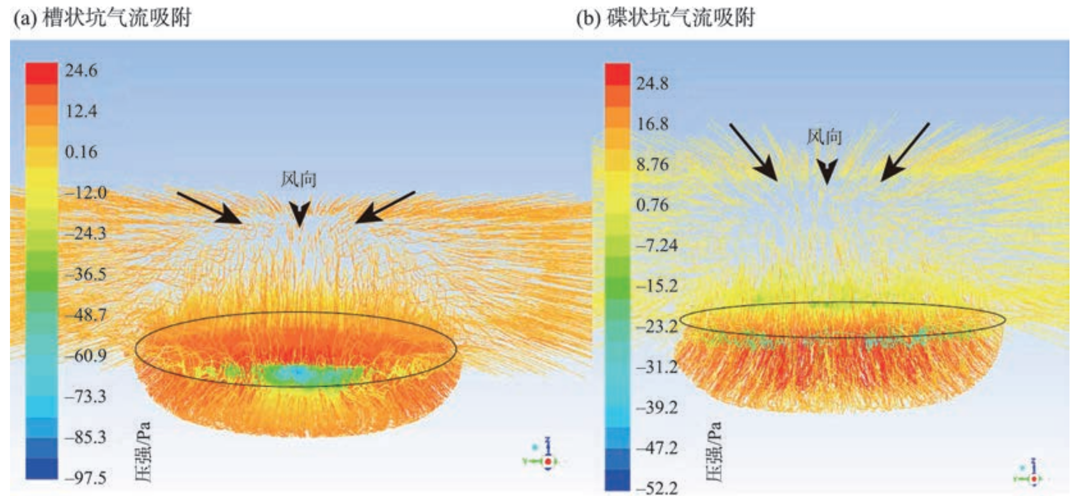


图12　风蚀坑流场显示的气流吸附效应

Fig. 12　Adsorption effect of airflow in blowout flow field

表1　风蚀坑对地表蚀积的影响

Tab. 1　Influence of blowout on surface erosion and deposition

影响因素		7.5 m·s^{-1}风速			8.5 m·s^{-1}风速		
		平坦沙地沙盘	小尺度风蚀坑沙盘	大尺度风蚀坑沙盘	平坦沙地沙盘	小尺度风蚀坑沙盘	大尺度风蚀坑沙盘
质量/kg	吹蚀0 min	6.526	6.526	6.526	6.526	6.526	6.526
	吹蚀12 min	6.337	6.321	6.309	5.506	5.474	5.435
风蚀量/kg		0.189	0.205	0.217	1.020	1.052	1.091
风蚀量百分比/%		100.00	108.47	114.81	100.00	103.14	106.96

分别比平坦沙地沙盘的大8.47%、14.81%。可见,在相同风速下有风蚀坑沙盘的风蚀量大于平坦沙地沙盘,且风蚀坑尺度越大风蚀量越大;相同模型条件下风速越大,风蚀量越大。因此,侵蚀程度与风速成正比,风蚀坑加剧了地表侵蚀,且侵蚀程度与风蚀坑尺度有关,风蚀坑尺度越大侵蚀越强。

4.2 风蚀坑发育的关键机制

前人研究都已证实风蚀坑的起始和发育源于外部因素(风沙流[27]、沙丘[28])和内部因素(龟裂纹)的耦合[14]。当地表产生风蚀破口时,微小的负地形对局部气流运动产生了阻滞,气流经历扩散减速和溢出加速过程,破口内的沉积物随之被侵蚀搬运,破口逐渐扩大和加深;随之对气流阻滞作用也加强,下伏沉积物被气流侵蚀吹走,形成表面光滑的流线型外形,形成雏形坑。不同风向的风沙流对雏形坑可从不同方向进行侵蚀和形态塑造,并最终形成与区域风况相适应的外形;雏形坑规模逐渐扩大,风蚀坑内气流的阶段性变化更加强烈,潜蚀强烈发育,使下伏更多沉积层出露,形成质地软硬相间的侧壁,并产生强烈的差异性侧蚀[29],在重力作用下发生块体崩塌,侧蚀快速发展,逐渐形成碟状坑和槽状坑;风蚀坑逐步扩大,相互联通,形成风蚀谷和风蚀残墩[30]。在台特玛湖干涸湖盆区,槽状坑和蝶状坑形态差异与盛行风方向、发育时间、下垫面植被状况及微地貌起伏状况等有关。单一风况下,发育时间较长,成为槽状坑;相对复杂风况,且发育时间较短,成为碟状坑。槽状风蚀坑常有陡峭的侧壁,而在坑底沿侧壁有少量崩塌的块体[24],这就是气流对软硬相间侧壁沉积物侧向差异性掏蚀的表现。侧壁掏蚀的气流有沿纵轴进入坑内的侧向绕流和螺旋涡流,也有坑体周边吸附进入的涡流。

5 结 论

风蚀坑是沙漠化地区的重要地貌形态,也是风蚀沙漠化过程的重要地貌过程。由于台特玛湖干涸湖盆区地表植被极为稀少,发育的风蚀坑形态有别于草原和海岸区,仅有坑体,而没有坑后积沙区,形态以槽状坑和碟状坑为主。风洞观测和CFD模拟显示:

(1) 两种风蚀坑对近地表气流造成强烈扰动,槽状风蚀坑和碟状风蚀坑内气流速度和压强变化模式基本相似,坑口气流速度变化呈加速—减速—加速,压强呈低压—高压—低压,在出风侧处形成加速尾流恢复区,而底面呈减速—加速—减速—加速,压强呈低压—高压,在出风侧处形成高压强气流溢出区,两种模型气流差异在于个别变化区范围的大小。

(2) 研究发现,由于负地形对气流的扰动,在入风侧处发育涡流,在槽状坑侧壁有螺旋环流,内部有弧形前进流。

(3) 两种风蚀坑均具有一定强度风沙流吸附效应,将水平和上层气流的能量和风沙流聚集到坑内,加剧了坑体的风蚀速度。风蚀坑吸附效应是风蚀坑发育的关键作用机制。从风洞实验研究也发现,风蚀坑加剧了地表侵蚀,侵蚀程度与风蚀坑尺度有关,风蚀坑尺度越大对地表侵蚀越强。

参考文献(References)

[1] Weng W S, Hunt J, Carruthers D J, et al. Air flow and sand transport over sand-dunes[J]. Acta Mechanica, 1991, 2: 1-22.

[2] Stam J M T. On the modelling of two-dimensional aeolian dunes[J]. Sedimentology, 1997, 44(1): 127-141.

[3] Hesp P A, Hastings K. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 193-204.

[4] Wiggs G, Weaver C M. Turbulent flow structures and aeolian sediment transport over a barchan sand dune[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(5): 1-7.

[5] 蔡东旭, 李生宇, 刘耀中, 等. 台特玛湖干涸湖盆区植物风影沙丘的形态特征[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1020-1028. [Cai Dongxu, Li Shengyu, Liu Yaozhong, et al. Morphological characteristics of shadow dunes of plant at dry lakebed of Taitema Lake[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 1020-1028.]

[6] Liu B, Qu J, Zhang W, et al. Numerical simulation of wind flow over transverse and pyramid dunes[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2011, 99(8): 879-888.

[7] Jungerius P D. A simulation model of blowout development[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1984, 9(6): 509-512.

[8] Smyth T A G, Jackson D W T, Cooper J A G. Computational fluid dynamic modelling of three-dimensional airflow over dune blowouts proceedings of the global sand seas[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 64: 314-318.

[9] Smyth T A G, Jackson D W T, Cooper J A G. High resolution measured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout[J]. Geomorphology, 2012, 177-178: 62-73.

[10] 张德平, 王效科, 哈斯, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究

(1)——形态、分类、研究意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 894-902, 1052-1058. [Zhang Deping, Wang Xiaoke, Hasi, et al. Hulun Buir sandy grassland blowouts: Geomorphology, classification, and significances[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(6): 894-902, 1052-1058.]

[11] Jungerius P D, Witter J V, Boxel J H. The effects of changing wind regimes on the development of blowouts in the coastal dunes of the Netherlands[J]. Landscape Ecology, 1991, 6(1-2): 41-48.

[12] 刘建辉, 郭占荣, 雷怀彦, 等. 福建长乐东部海岸沙丘风蚀坑研究[J]. 应用海洋学学报, 2008, 27(2): 230-236. [Liu Jianhui, Guo Zhanrong, Lei Huaiyan, et al. A study on coast dune blowout in the east coast of Changle[J]. Journal of Applied Oceanography, 2008, 27(2): 230-236.]

[13] Jungerius P D, Vandermeulen F. The development of dune blowouts, as measured with erosion pins and sequential air photos[J]. Elsevier, 1989, 16(4-5): 369-376.

[14] 庄燕美, 哈斯. 沙丘风蚀坑的形态及动力过程的研究进展[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 632-637. [Zhuang Yanmei, Hasi. Research of the study on shapes and dynamical process of blowouts on dunes [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(5): 632-637.]

[15] 贾丹阳, 熊祯祯, 高岩, 等. 近30 a台特玛湖地区土地利用/土地覆被变化及其影响因素[J].干旱区地理, 2021, 44(4): 1022-1031. [Jia Danyang, Xiong Zhenzhen, Gao Yan, et al. Land use/land cover change and influencing factors in Taitema Lake area in past 30 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1022-1031.]

[16] 任宏晶. 台特玛湖干涸湖盆区沉积物含盐量对风蚀影响的风洞模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. [Ren Hongjing. Wind tunnel simulation of the effect of sediment salt content on wind erosion in the dry lake basin of Taitema Lake[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.]

[17] 刘晏良, 焦广辉, 戴健, 等. 塔里木河流域生态环境系统演变与治理对策研究[C]//新疆发展和改革委员会, 中国新疆维吾尔自治区: 出版者不详. 2000. [Liu Yanliang, Jiao Guanghui, Dai Jian, et al. Study on the evolution of ecological environment system and control countermeasures in Tarim River Basin[C]//Xinjiang Development and Reform Commission, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China: Publisher unknown, 2000.]

[18] 王帅, 哈斯. 沙质草原槽形风蚀坑表面沉积物粒度特征[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 122-125. [Wang Shuai, Hasi. Particle size variation in trough blowout on sandy grassland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 122-125.]

[19] 张惜伟. 典型沙质草原风蚀坑演化过程与发育机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. [Zhang Xiwei. Study on evolution process and development mechanism of wind erosion pits in typical sandy grassland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.]

[20] 董周宾, 颜丹平, 张自力, 等. 基于粒子图像测速系统(PIV)的砂箱模拟实验方法研究与实例分析[J]. 现代地质, 2014, 28(2): 321-330. [Dong Zhoubin, Yan Danping, Zhang Zili, et al. Research on methods of sandbox modeling and case study based on particle image velocimetry(PIV)[J]. Geoscience, 2014, 28(2): 321-330.]

[21] 陈柏羽, 程建军, 李生宇. 新疆S214省道高立式芦苇沙障合理间距分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 782-789. [Chen Boyu, Cheng Jianjun, Li Shengyu. Reasonable spacing of high-parallel reed sand barriers along the Xinjiang S214 provincial highway[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 782-789.]

[22] 王帅, 哈斯. 呼伦贝尔沙质草原槽形风蚀坑表面气流特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 80-85. [Wang Shuai, Hasi. Air flow dynamics of the blowout trough in the Hulun Buir sandy grassland [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 80-85.]

[23] 孙禹, 杜会石, 哈斯, 等. 固定沙丘风蚀坑风沙动力学观测研究[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1562-1570. [Sun Yu, Du Huishi, Hasi, et al. Aeolian dynamical process of blowout on the fixed dune [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1562-1570.]

[24] Ferguson, Victoria, Gellasch, et al. Windflow circulation patterns in a coastal dune blowout, south coast of Lake Michigan[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(2): 451-462.

[25] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京:科学出版社, 1987. [Wu Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987.]

[26] Hesp P. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics[J]. Geomorphology, 2002, 48(1): 245-268.

[27] 张德平, 孙宏伟, 王效科, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑研究(Ⅱ): 发育过程[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 20-24, 170-171. [Zhang Deping, Sun Hongwei, Wang Xiaoke, et al. Hulun Buir sandy grassland blowouts (Ⅱ): Process of development and landscape evolution[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 20-24, 170-171.]

[28] Cai D X, Li S Y, Gao X, et al. Wind tunnel simulation of the aeolian erosion on the leeward side of barchan dunes and its implications for the spatial distribution patterns of barchan dunes[J]. Catena, 2021, 207(105583): 1-12.

[29] 林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等. 新疆楼兰地区雅丹地貌差异性侵蚀特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 33-39. [Lin Yongchong, Mu Guijin, Qin Xiaoguang, et al. Erosion characteristics of Yardangs at Loulan area, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 33-39.]

[30] 阎旭, 张德平, 夏显东, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑形态发育模式分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 212-218. [Yan Xu, Zhang Deping, Xia Xiandong, et al. Morphology and developmental mode of blowouts in Hulun Buir sandy grassland, China[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 212-218.]

Three dimensional flow field characteristics of two typical blowout in the dry lake basin of Taitema Lake and their influence on wind erosion

CUI Kejun[1,2,3,4,5], LI Shengyu[1,2,3,4,5], WANG Haifeng[1,2,3,5], FAN Jinglong[1,2,4,5]

(1. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 4. Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Korla 841000, Xinjiang, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Blowouts in the dry lake basin of Taitema Lake, south Xinjiang, China are primarily slotted pits and saucer-shaped pits, and the surface wind erosion is not only influenced by the incoming wind velocity but also strongly influenced by the three-dimensional (3D) flow field in these blowouts. Based on wind tunnel experiments and computational fluid dynamics numerical simulations, the 3D flow field of blowouts is investigated. The following results are found: (1) From the air inlet to the air outlet, the wind speed at the bottom of the grooved and dished blowouts exhibits a change mode of deceleration-acceleration-deceleration-acceleration. The wind speed in the horizontal plane, where the upper mouth is located, exhibits a change mode of acceleration-deceleration-acceleration. The air pressure at the upper mouth also changes spatially accordingly. The overall change mode of the grooved and dished blowouts is low pressure-high pressure-low pressure. The change of trough pit is more obvious. (2) Both blowouts have a certain adsorption effect on wind and sand flow, causing wind and sand flow into the pits, accumulating energy, wind, and sand flow and intensifying wind erosion development. (3) Blowouts intensify surface erosion, and the degree of erosion is related to the scale of the blowout; the larger the scale of the blowout, the stronger the surface erosion. This study visualizes the 3D velocity, pressure, and wind-sand flow distribution patterns in trough-shaped and disc-shaped blowouts and proposes a wind-sand flow adsorption mechanism in these blowouts, the results of which can provide theoretical guidance for inland dry lake basin desertification control.

Key words: blowout; wind tunnel experiments; CFD numerical simulation; wind and sand flow